

職業能力開発総合大学校小平キャンパスにおける エネルギー消費量の分析

Analysis of Energy Consumption in Kodaira Campus of Polytechnic University

橋本 幸博 鳥海 吉弘 山口 喜之 (職業能力開発総合大学校)
林 昇吾 (宮崎職業能力開発促進センター)

Yukihiro Hashimoto, Yoshihiro Toriumi, Yoshiyuki Yamaguchi and Shogo Hayashi

本論文は、職業能力開発総合大学校（以下、職業大）小平キャンパスにおけるエネルギー消費量の分析結果を検討している。既存建築物の ZEB 化を推進する上で、エネルギー消費量の分析は不可欠である。これによって、効果的な省エネルギー手法及び節電方法を検討することが可能になる。学校施設では、敷地が広く、中低層階の建物が多いことから、エネルギー消費密度が低いため、ZEB の実現可能性が高い。そこで、本研究では、職業大小平キャンパスの ZEB 化を計画するために、エネルギー消費量の現状分析を行う。夏期と冬期の代表日におけるエネルギー消費量の傾向を変電所系統ごとに調査して、エネルギー消費のあり方を精査する。

キーワード：ZEB (Zero Energy Building)、エネルギー消費量、電力デマンド、ピーク電力、省エネルギー

1. はじめに

日本のエネルギー消費量は、図 1 に示すように高度経済成長期以降も著しく増加している¹。特に業務部門に家庭部門を加えた民生部門では、1973 年と 2012 年を比較すると、約 2.4 倍に増加している。また、2005 年から消費エネルギーが減少しているのは、運輸部門と産業部門における減少によるところが大きい。さらに、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の影響により、原子力発電所が全停止し、火力発電所の一部も運転停止をしたことから、深刻な電力不足に陥った。現在も、日本の電力需給はピーク時に逼迫する状況にあり、エネルギー需給の改善が必要とされている。

国際エネルギー機関 (IEA) は、洞爺湖サミットにおける省エネルギー勧告で ZEB (Zero Energy Building) に関して G8 各国が導入目標を設定するとともに、市場の拡大措置を取ることを求めた²。ZEB の一般的な定義は、建物のバウンダリー (敷地境界内) において、消費エネルギーをオンサイトの再生可能エネルギーで賄うことのできる建築物ということになる^{3,4}。ZEB を実現するためには、これまで以上に建築物の省エネルギーを徹底し、太陽熱や自然換気などの自然エネルギー利用を推進することによってエネルギー負荷の低減を図るとともに、最低限必要なエネルギーについては自立的に再生可能エネルギーによって賄うことが求められる。

日本のオフィスビルのエネルギー消費原単位 (一次エネルギー消費量) は、約 2000MJ/(m²・年)であり、都心の狭い敷地で ZEB を実現するのは、太陽光発電などの再



図 1 最終エネルギー消費と実質 GDP の推移
(資源エネルギー庁：エネルギー白書 2014、pp140)

生可能エネルギーの生産に必要な面積が得られないことから、ほぼ不可能である。それに対して、住宅では、エネルギー消費原単位は約 500MJ/(m²・年)であり、オフィスビルと比較すると遙かに ZEB の実現性が高い。同様に、学校施設も中低層階の建物が多く、敷地に余裕があり、土・日曜日等の休日や夏期休暇等の長期休暇があるため、太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーによる電力供給が可能であることと、他の用途の建築物と比べて年間床面積当たりのエネルギー消費量が小さいことから、ZEB 化の取組みが可能であると考えられる。ちなみに学校施設のエネルギー消費原単位は、小中学校で 370MJ/(m²・年)、高校で 415MJ/(m²・年)、大学で 1,023MJ/(m²・年)である⁵。従って、我が国のエネルギー消費量削減を効果的に行うためには、住宅だけでなく、

学校施設の ZEB 化を進めていくことが重要である。文部科学省と国土交通省では、学校ゼロエネルギー化に向けて、実現可能性に関する検討を実施している⁵。その目的としては、省エネルギーによる温室効果ガス削減だけでなく、ZEB 化による防災機能への貢献と環境教育への寄与が挙げられている。学校施設は地域の防災拠点となることが多く、環境教育は未来に向けて地球環境を健全化する上で知的・精神的基盤となることから、学校の ZEB 化は重要なテーマである。ここでは、小中学校を中心に検討が行われているが、前述の学校施設の特徴及び ZEB 化の目的については大学にも共通している。

本研究では、職業能力開発総合大学校（以下職業大とする）小平キャンパスにおける既存建築物の ZEB 化実現を目的としたエネルギー消費量削減のため、2013 年度の電力消費についての分析と検討を行ったので、その内容について報告する⁶。

2. 対象建築物の概要

職業大小平キャンパスは東京都小平市に位置しており、敷地面積は約 4.2ha である。敷地は東西に細長い形状をしている。主要な建築物としては 1 号館～8 号館、体育館・食堂の 9 棟である。第一、第二、第三変電所で高圧（6600V）受電して、第一変電所は 4～6 号館に、第二変電所は 1～3 号館に、第三変電所は 7・8 号館、体育館・食堂・グラウンドにそれぞれ電力を供給している。なお、共用棟及び学生寮の電力供給は別系統になっている。建築物の位置関係を図 2 に、各変電所の電力供給延床面積を表 1 にそれぞれ示す。表 2 に各建物の主な用途を示す。

ほとんどの建物は、昭和 63 年（1988 年）から平成 7 年（1995 年）にかけて竣工し、2 号館と 8 号館は平成 11 年（1999 年）に竣工した。建物は主として鉄筋コンクリート造であり、一部鉄骨造になっている。窓ガラスは、単層普通ガラスで、窓枠はアルミニウム製である。空調システムは、主として天井埋込カセット型のビル用マルチエアコンであり、各室のスイッチで運転・停止、冷暖房切替及び設定温度変更が可能である。換気ファンは、給排気共に手元スイッチで運転され、空調運転における外気負荷軽減のために、一部で全熱交換器が導入されている。照明設備は、主として天井露出型蛍光灯であり、省エネルギーを考慮して Hf（高周波点灯専用形）蛍光灯器具としている。廊下、トイレなどの共用部分では、赤外線センサーによる自動点灯・自動消灯を行っている。

3. エネルギー消費量の分析

3.1 エネルギー消費量データ

職業大小平キャンパスでは、エネルギー源として、特定規模電気事業者からの商用電源と東京ガスからの都市ガス（13A）の供給を受けている。電力の契約デマンド

は 1350kW である。本研究では、職業大小平キャンパスの電力消費を対象として、エネルギー消費量の分析と検討を行う。過去の都市ガスによるエネルギー消費量を調査すると、電力によるエネルギー消費量と比較して 0.2% 程度と推定されることから、ここでは都市ガスによるエネルギー消費量を無視するものとする。

1 号館 1 階総務課施設管理係で電力デマンドを監視・記録しており、各電力システムの毎正時の電力及び積算電力量等のデータが 1 日単位でパーソナル・コンピューターに保存されている。本研究では 2013 年 4 月から 2014 年 3 月の 1 年間の電力デマンドデータを使用する。ただし、共用棟及び学生寮の消費電力は、本研究で使用する電力デマンドデータに含まれていない。

各変電所では高圧（6600V）を低圧（100/200V）に変圧して、低圧電灯、低圧動力、低圧実験動力、低圧一般動力の負荷に系統分けしている。ここでは、変電所ごとに、各負荷系統の電力量の合計値をデータとして採用する。



図 2. 職業大小平キャンパスの建物配置

表 1. 変電所ごとの供給延床面積

変電所	対象建物	供給延床面積 [m ²]
第一変電所	4～6 号館	7,541
第二変電所	1～3 号館	10,495
第三変電所	7・8 号館、体育館・食堂、グラウンド	4,541

表 2. 建物の主な用途

建物	階数	主な用途
1 号館	地上 4 階	オフィス・サーバー室・会議室
2 号館	地上 7 階	実習場・研究室・CAD 室・図書館
3 号館	地上 3 階	講堂・教室・研究室・CAD 室
4 号館	地上 4 階	研究室・実験室・実習場・CAD 室
5 号館	地上 1 階	実験室・実習場（電気系）
6 号館	地上 2 階	研究室・実験室・実習場（機械系）
7 号館	地上 2 階	研究室・実験室・実習場（建築系・電気系・電子情報系）
8 号館	地上 2 階	実験室・実習場（機械系）
共用棟	地上 2 階	教室・研究室
学生寮	地上 4 階	学生寮

3.2 夏期・冬期代表日の消費電力

図3に夏期及び冬期代表日の消費電力の推移を示す。代表日の選定条件として、「①職業大の平常授業日」、「②一日最高気温が最も高い日（夏期の場合）または、一日最高気温が最も低い日（冬期の場合）」の①と②を同時に満たす日とする。以上から、夏期代表日は2013年8月30日（金）であり、最高気温は36.0℃（14時）であった。また、冬期代表日は2014年1月15日（水）であり、最高気温は3.9℃（16時）であった⁷。

図3より、消費電力のピークは、夏期代表日では13時に750kWであり、冬期代表日では13時に850kWであり、冬期代表日の方がピーク電力は大きい。この要因として、その時刻が三限の講義開始時の教室のエアコン使用による空調運転立上がり及び実習設備等の使用開始時であることが考えられる。職業大では、ローカルでエアコンの室温設定が可能なので、教室等の室温の設定値は利用者の任意に委ねられている。冬期代表日13時の外気温（府中）は2.1℃である。教室のエアコンは天井埋込カセット型であり、冷暖房運転時には天井から冷温風が吹き下ろされる。特に、暖房運転開始時は、冷気が教室下部の居住域高さに停滞して、天井高さ3m付近からエアコンの温風を吹き下ろしても居住域が快適な温度範囲に到達するまでに時間を要する。そのため、暖房時は設定温度を高めにする傾向がある。特に、暖房立上がり時は、暖房の効果が現れるまでに時間がかかるので、設定温度をかなり高くしていることが多い。従って、午後のピーク電力の発生原因は教室等のエアコンの暖房運転によるものと考えられる。4限の授業が終了した17時からは急激に消費電力が低下する。夏期も同様の傾向が見られる。

ピーク電力に対する平均負荷率は、夏期代表日では48.6%、冬期代表日では54.4%である。また、ピーク電力に対する夜間電力の比率は、夏期代表日では約20%、冬期代表日では約21%である。従って、在室者がいない夜間でも、ピーク電力に対して約20%、平均使用電力に対しても半分弱のエネルギー消費があることがわかる。

なお、本文では「夏期」を冷房需要がある6月～9月、「冬期」を暖房需要がある12月～3月、「中間期」を4月、5月、10月、11月とする。

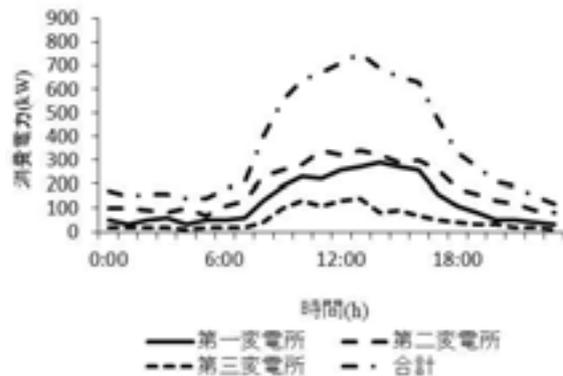
3.3 日毎の消費電力量

図4に日毎の消費電力量を月毎に分けて示す。ただし、4月1日と2日のデータは欠落している。年間を通して消費電力量の傾向を概観すると、4月から6月上旬までは概ね1日6000kWh以下であり、6月中旬から10月上旬にかけて6000kWhを超える。この期間の最大電力量は7月12日（金）の9300kWhである。これは、冷房需要によるものと考えられる。同様に、10月中旬から11月上旬はほぼ1日6000kWh以下であり、11月中旬から3月上旬にかけて6000kWhを超える。この期間の最大電力量は1月7日（火）の10840kWhである。3月中旬から

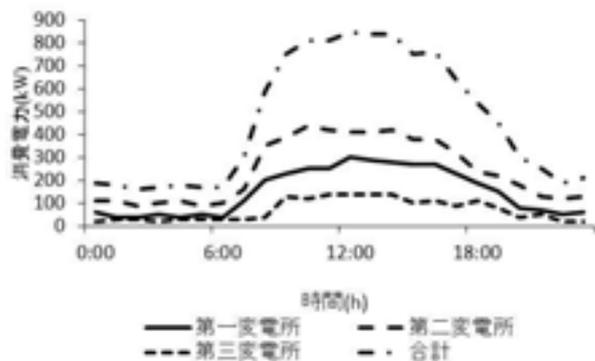
下旬にかけては、再び1日6000kWh以下となる。11月中旬から3月上旬にかけて1日の消費電力量が6000kWhを超えたのは暖房需要によるものと考えられ、暖房運転期間のピーク電力量は冷房運転期間のピーク電力量より大きい。

図5に夏期と冬期の休日を除く1日の平均外気温⁷と消費電力量の相関を示す。夏期における1日の平均外気温と消費電力量には正の相関が見られるが、強い相関ではない。夏期は冷房需要が消費電力量に影響を与えると考えられるが、在室人員、日射量なども冷房負荷に影響を与えることから、平均外気温以外の影響も大きい。また、回帰直線の勾配の絶対値（154kWh/K）も冬期（361kWh/K）より小さく、消費電力量の外気温依存性が冬期より弱いことがわかる。

冬期における1日の平均外気温と消費電力量にはやや強い負の相関が見られる。相関係数は夏期より大きく、冬期におけるエネルギー消費量に対して大きい影響を及ぼすのは暖房需要であることが推定できる。平均外気温が5℃以下のときの消費電力量と15℃程度のときの消費電力量では、2倍近い差が見られる。

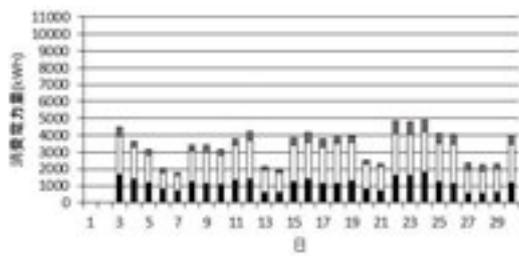


(a) 夏期代表日（2013年8月30日（金））

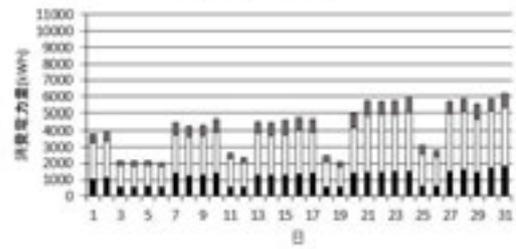


(b) 冬期代表日（2014年1月15日（水））

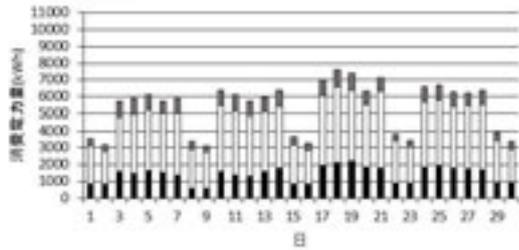
図3. 夏期及び冬期代表日における消費電力の推移



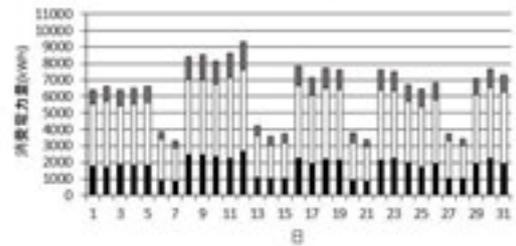
(a) 4月の消費電力量



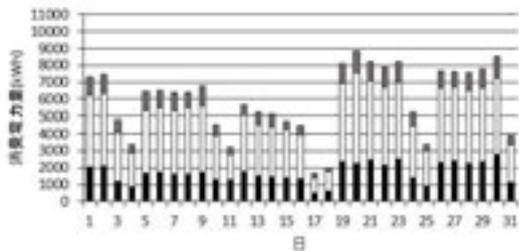
(b) 5月の消費電力量



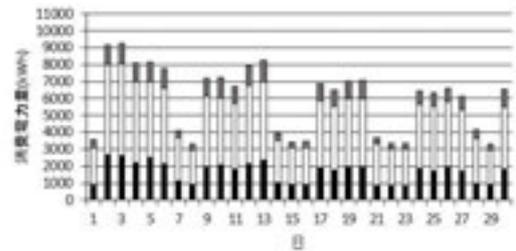
(c) 6月の消費電力量



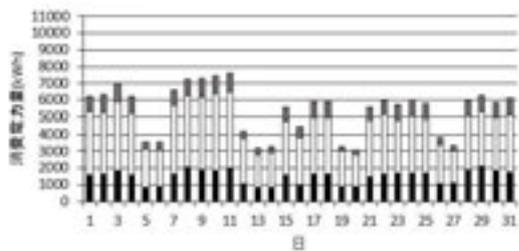
(d) 7月の消費電力量



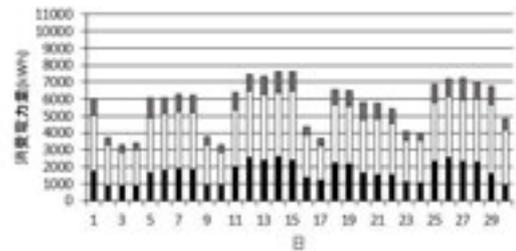
(e) 8月の消費電力量



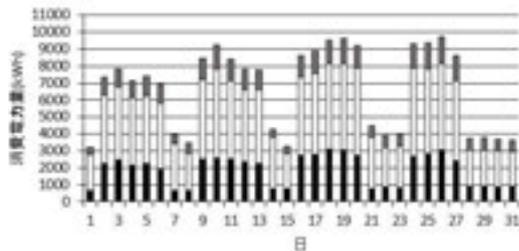
(f) 9月の消費電力量



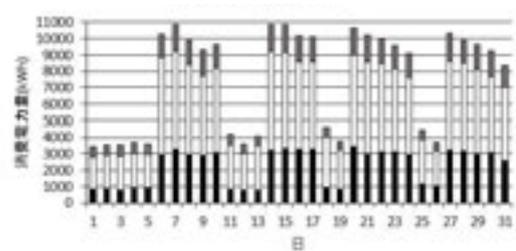
(g) 10月の消費電力量



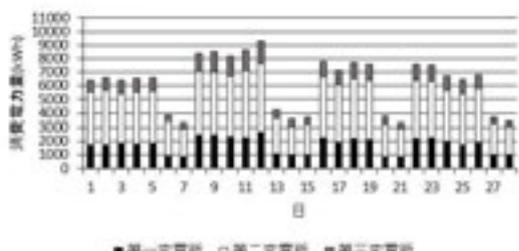
(h) 11月の消費電力量



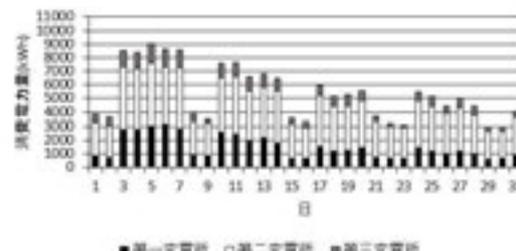
(i) 12月の消費電力量



(j) 1月の消費電力量



(k) 2月の消費電力量



(l) 3月の消費電力量

図4 毎月の日毎の消費電力量 (2013年4月~2014年3月)

3.4 月毎の消費電力量

図 6 に月毎の消費電力量を示す。最大月間消費電力量は 1 月の 234,730kWh であり、最小月間消費電力量は 4 月の 94,930kWh であり、平均月間消費電力量は 171,905 kWh である。

4 月の消費電力量には 1 日と 2 日のデータが欠落しているが、平日の消費電力量は 4000kWh 程度なので、それを考慮しても 4 月の月間消費電力量が最小であることに変わりはない。4 月の月間消費電力量が最小である理由としては、気温の上昇に伴い、暖房需要が減少したことによるものと考えられる。

平均値より月間消費電力量が大きいのは、7 月～9 月と 12 月～2 月であり、冷房期間と暖房期間に対応している。7 月～9 月の平均値は 186,267kWh であり、12 月～2 月の平均値は 204,830kWh であり、暖房期間の方が冷房期間より月間消費電力量が大きい。

中間期である 10 月の月間消費電力量がそれほど低下しないのは、10 月にも冷房需要があり、エアコン稼働時間が長いことによるものと考えられる。10 月の前半には最高外気温度⁷が 25℃を超える日が続く。11 月に入ると、外気温度が低下して、暖房需要が始まると考えられる平均外気温度 14℃以下の日が出現する。従って、秋期に冷暖房需要がないと考えられるのは 10 月後半の限られた期間となる。

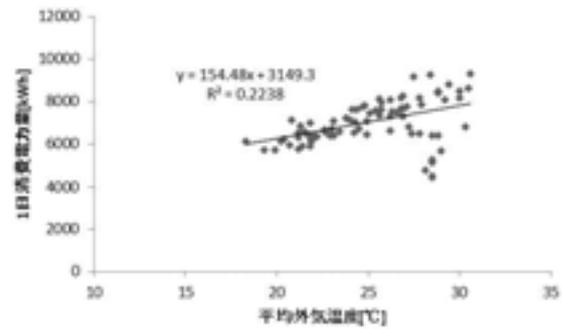
3.5 エネルギー消費原単位

年間の消費電力量の合計は 2,062,842kWh となるので、第一、第二、第三変電所の供給延べ床面積合計の 22,577m² で除して年間単位床面積当たりに換算すると、91.4kWh/(m²・年)となる。これを 1 次エネルギー消費量に換算すると、エネルギー換算値が 9.97MJ/kWh^{注1}なので、911.0MJ/(m²・年)となる。大学における 1 次エネルギー消費量は前述のように 1,023MJ/(m²・年)であり、職業大小平キャンパスにおける 1 次エネルギー消費量はこれより約 10%小さい値である。この理由としては、実習場、体育館、食堂など、床面積が大きい割にエネルギー消費量が低い室や利用時間が比較的短い室が多いこと及び人員密度が比較的低いことによると考えられる。

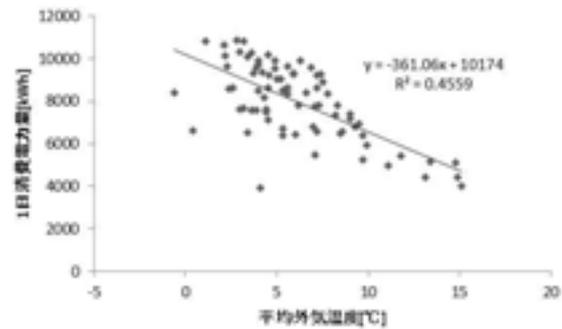
4. 省エネルギー・節電手法の提案

4.1 省エネルギー手法の提案

建築物の ZEB 化を推進するためには、厳しい省エネルギーの取り組みが不可欠である。東京地域でモデル学校（平均的な学校）におけるエネルギー消費量の内訳は、照明 45%、暖房 22%、換気 14%、コンセント 8%、冷房 4%、給湯 2%である⁵。職業大小平キャンパスでは、主なエネルギー消費は、以上と同様に空調システムと照明設備によるものと考えられる。省エネルギーを効果的に実施するためには、パレートトップから対策をしなければならぬ。そこで、以上のエネルギー消費に関する検討



(a) 夏期 (2013 年 6 月～9 月)



(b) 冬期 (2013 年 12 月～2014 年 3 月)

図 5 日平均外気温度と消費電力量の相関 (ただし休日は除く)

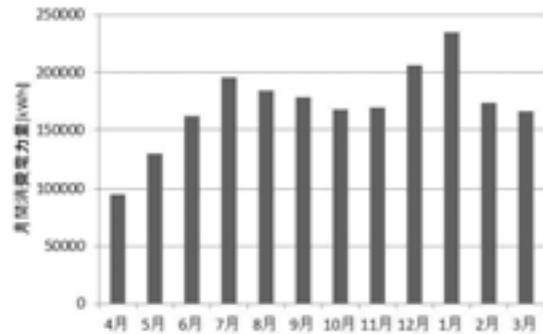


図 6 月毎の消費電力量 (2013 年 4 月～2014 年 3 月)

結果から、次のような提案を行う。

(1) LED 照明の採用

エネルギー消費量の負荷毎の比率は不明であるが、照明によるエネルギー消費量の比率は高く、年間の変動が小さいものと推定される。現在は、照明器具に Hf 蛍光灯ランプ^{注2}を使用していて、ランプ 1 本 32W の消費電力であり、一般の蛍光灯 40W と比較すると 20%の節減となっている。これを LED 照明に変更すると、消費電力は 23W (たとえば、東芝ライテック(株) 直管形 LED ランプ Hf32 高出力タイプ 昼白色 光束 3500lm⁸)になり、現在より約 30%減少する。

(2) BEMS の導入

BEMS (ビルエネルギー管理システム) を導入して、

エアコン・照明の状態監視を行う。エアコンの運転・停止、冷暖房切替及び温度設定を中央から行い、エアコンの消し忘れや適正な設定温度の管理を実施する。図5から冬期における電力消費量の外気温度依存性が高いことがわかるので、特にエアコンの運転管理及び暖房設定温度の管理を実施すれば、省エネルギー効果が大きいものと考えられる。照明の点灯・消灯は手元スイッチでも可能とするが、照明の状態監視によって、教室や事務室などの照明の消し忘れをなくすることができる。

(3) 教室の窓ガラスの高断熱化

教室では、床面積と比較して窓面積が大きく、窓ガラスは単層ガラスで熱貫流率 U が大きく（透明 5mm $U=5.9W/(m^2K)$ ）、枠はアルミニウム製でヒートブリッジが発生する。そのため、特に冬期の温熱環境に悪影響を与えるだけでなく、暖房需要の増大を招いている。これは、冬期の消費電力量が夏期より多いことから、推定できる。そこで、窓ガラスを複層（透明 3mm+空気層 12mm+透明 3mm $U=2.9W/(m^2K)$ ）⁹にして、枠を木製または樹脂製にする。これにより、冬期の教室の温熱環境が改善されるとともに、暖房によるエネルギー消費量が減少する。

(4) 昼光照明の利用

教室は窓面積が大きく、昼光利用が可能であるが、実際は窓側の座席では昼光が眩しいので、カーテンやブラインドを閉めて、教室の全部で人工照明を使用している。そこで、人工照明の使用を抑制するために、外部にライトシェルフを設置するなどの方法を採用して、教室の窓側における昼光利用を促進する。教室の照明のスイッチは縦方向にゾーニングされているので、昼光照明を利用すれば窓側の照明を消灯することが可能である。

(5) 自然換気の促進

開口部の開放による自然換気を促進して、機械換気の使用を抑制し、また中間期には外気冷房効果によりエアコンによる冷房運転を抑制する。特に天井の高い実習場や吹抜空間を有する建物では、自然換気の促進を図る。CAD室のように室内発熱の大きい室では、中間期及び冬期においても冷房需要が発生する。そのため、窓開けによる外気冷房によって、エアコン及び換気ファンの使用を抑制することができる。

(6) 教職員・学生の環境教育の促進

環境教育促進法^{10,11}では、家庭、学校、職場、地域における環境教育の機会提供の促進を求めている。温室効果ガス排出による環境負荷の低減となることから、省エネルギー教育も環境教育の対象に含まれる。職業大においても、教職員及び学生に対して省エネルギー教育を促進することによって、温室効果ガス低減に向けた意識改革と具体的な省エネルギー・節電行動を実施することが重要である。三重大学や福井大学等では、教職員・学生に対して省エネルギー対策を中心とした環境教育を行っている^{10,11}。

4.2 節電方法の提案

年間を通じて夜間電力の使用が 150kW 程度存在していることから、これが 24 時間 365 日のベース消費電力となっているものと推定される。この中には、電算室のサーバーの消費電力 18.2kW が含まれるが、そのほかに常夜灯・非常灯・機械警備・エレベーター・実験用・CAD室サーバー・冷蔵庫の電力等の常時使用電力があるものと考えられる。しかし、個人が使用するコンピューター・電気ポット・プリンター等の不必要な負荷が放置されている可能性がある。仮に不使用時の電源オフを徹底することによって定常的に 10kW の負荷を節電することができれば、1 日（24 時間）で約 5000 円、年間で約 200 万円の節約になる。

建物内部の共用部の照明は、大部分が赤外線センサーによる自動点灯・自動消灯になっているので、消し忘れがなく、十分な節電効果を上げているものと思われる。

5. まとめ

本研究は、職業大小平キャンパスにおけるエネルギー消費量を通年で分析することによって、現状のエネルギー消費傾向の把握と将来の節電・省エネルギー手法の提案を行っている。

今後は、ガス消費量及び共用棟と学生寮のエネルギー消費量を含めた長期間に亘るエネルギー消費傾向の分析を行い、再生可能エネルギーの利用可能性に関する検討を実施して、ZEB の実現に向けて提案を継続したいと考えている。

謝辞

本研究に関して、電力デマンドデータの提供をして下さった総務課施設管理係の皆様へ深謝申し上げます。

参考文献

1. 資源エネルギー庁：平成 24 年度エネルギー白書、2013
2. ZEB の実現と展開に関する研究会：ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の実現と展開について、2009
3. Kurnitski J.: Nearly zero energy buildings nZEB, the REHVA Journal, Vol.48 No.3, pp.4-12, May 2011
4. Torcellini P., Pless S., Deru M. and Crawley D.: Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition, Conference Paper NREL/CP-550-39833, National Renewable Energy Laboratory, June 2006
5. 文部科学省、国土交通省：学校ゼロエネルギー化へ向けて、2012
6. 山口喜之、橋本幸博、鳥海吉弘：職業大小平キャンパスにおけるエネルギー消費量の分析結果、職業大フォーラム

2014 講演論文集、pp.236-237、2014

7. 気象庁ウェブサイト 過去の気象データ検索 (府中)
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_a1.ph
8. 東芝ライテック(株)ウェブサイト
http://www.tlt.co.jp/tlt/products/facility/facility_led_indoor/led_baselight_lamp/led_baselight_lamp.htm
9. 旭硝子(株) ウェブサイト
<https://www.asahiglassplaza.net/gp-pro/knowledge/vol4.html>
10. 三重大学国際環境教育研究センターウェブサイト
<http://www.gecer.mie-u.ac.jp/topics/h23-EMS-kensyu.html>
11. 福井大学 「施設と環境」 ウェブサイト
<http://ems.ou.u-fukui.ac.jp/iso/d-14.html>

- 注1 エネルギー使用の合理化に関する法律施行規則第4条第3項第1号別表3(第4条関係)の昼間の電気の値
- 注2 Hf 蛍光灯ランプは、高周波点灯の電子安定器を用いた蛍光灯ランプであり、高効率、省電力、高照度の光源である。
- 注3 環境教育等による環境保全の取組の促進に関する法律(平成15年法律第130号)

*橋本幸博, 博士 (工学)
 職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町2-32-1 email:yhashimo@uitech.ac.jp
 Yukihiro Hashimoto, Polytechnic University, 2-32-1
 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*鳥海吉弘, 博士 (工学)
 職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町2-32-1 email:toriumi@uitech.ac.jp
 Yoshihiro Toriumi, Polytechnic University, 2-32-1
 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*山口喜之,
 職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町2-32-1 email:yosshypjtj@gmail.com
 Yoshiyuki Yamaguchi, Polytechnic University, 2-32-1
 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*林昇吾,
 宮崎職業能力開発促進センター, 〒880-0916 宮崎県宮崎市大字恒久4241 email:Hayashi.Shogo@jeed.or.jp
 Shogo Hayashi, Miyazaki Polytechnic Center, 4241, Tsunehisa, Miyazaki, Miyazaki 880-0916

(原稿受付 2015/1/16、受理 2015/3/17)